

# Моделирование фазовых переходов в нанопленках мультиферроиков методом Монте-Карло

*Жармухаметов Айнур Ринатович*

*Нугуманов Айдар Гайсович*

*Башикирский государственный университет*

*Шарафуллин Ильдус Фанисович, к.ф.-м.н.*

*[aiderfarro@gmail.com](mailto:aiderfarro@gmail.com)*

Фазовые переходы и критические явления в пленках и массивных образцах мультиферроиков стали направлением интенсивных научных исследований в последние два десятка лет [1]. Фазовые переходы в мультиферроиках из пространственно модулированного магнитного состояния в однородное состояние сопровождаются скачком электрической поляризации [2]. В мультиферроиках обнаружена связь между дальним магнитным порядком и электрической поляризацией, одним из проявлений этой связи является формирование электрической поляризации при появлении дальнего магнитного порядка [3,4].

В нашей работе мы изучаем модель пленки мультиферроика, в которой параметры порядка ферроэлектрической и магнитной подсистем находятся на одном узле простой кубической кристаллической решетки. Для моделирования мы используем метод Монте-Карло. Гамильтониан магнитной и ферроэлектрической подсистем задаем моделью Изинга.

Гамильтонианы подсистем определим следующим образом:

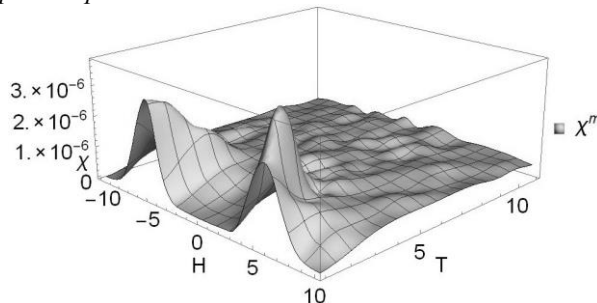
$$H_m = -J_m \sum_{i,j} s_i s_j - \sum_i H_z s_i \quad (1)$$

$$H_f = -J_f \sum_{i,j} p_i p_j - \sum_i E_z p_i \quad (2)$$

$$H_{mf} = -J_{mf} \sum_{i,j,k} s_i s_j p_k \quad (3)$$

где  $J_m$  - параметр обменного взаимодействия,  $J_f$  - параметр диполь-дипольного взаимодействия,  $s_i$  - спин на  $i$ -том узле,  $p_i$  - поляризация на  $i$ -том узле,  $H_z$  - проекция вектора напряженности внешнего магнитного поля на ось анизотропии,  $E_z$  - проекция вектора напряженности внешнего электрического поля.

Результаты моделирования получены для пленки размером  $L \times L \times N_z$ , где  $N_z = 4$  - число слоев,  $L$  - ширина образца (мы рассматривали диапазон значений  $L$  от 16 до 40). Обменные параметры принимались равными  $J_m = -1$ ,  $J_f = 1$ , параметр магнитоэлектрического взаимодействия варьировался от  $J_{mf} = -3.5 \dots 3.5$ . Модель имеет периодические граничные условия в плоскости пленки, при которых поверхность  $xy$  топологически эквивалентна полюсу тору. На каждое значение температуры и напряженности внешнего магнитного поля проводилось  $10^5$  итераций Монте-Карло и  $10^5$  итераций для усреднения. Некоторые из результатов приведены на *рис.1* и *рис.2*.



*рис.1* Восприимчивость спиновой подсистемы в зависимости от температуры и магнитного поля при  $L = 16$  и обменными параметрами  $J_m = -1$ ,  $J_f = 1$ ,  $J_{mf} = 0.5$ .

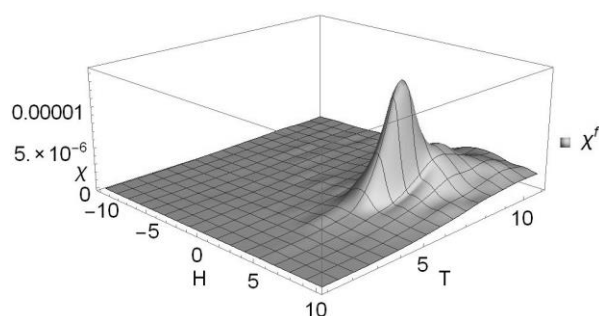


рис.2 Восприимчивость ферроэлектрической подсистемы в зависимости от температуры и магнитного поля при  $L = 16$  и обменными параметрами  $J_m = -1$ ,  $J_f = 1$ ,  $J_{mf} = 0.5$ .

На рис.1 изображен график зависимости восприимчивости спиновой подсистемы от температуры и магнитного поля, на котором наблюдаются фазовые переходы при отрицательном и положительном значении магнитного поля. Во втором случае пик восприимчивости приходится на значение температуры 2.3 в энергетических единицах.

График зависимости восприимчивости ферроэлектрической подсистемы от температуры и магнитного поля представлен на рис.2. Фазовый переход при температуре 7, наблюдается лишь в положительной области значений магнитного поля, что обусловлено особенностями модели кристаллической решетки и значениями обменных параметров.

В результате нами определены: основное состояние пленки мультиферроика с орторомбической симметрией спиновых и ферроэлектрических подсистем, а также полевые и температурные зависимости энергетического спектра, намагниченностей, теплоемкостей и восприимчивостей. Наблюдаются различные типы фазовых переходов для обоих параметров порядка, при  $J_{mf}$  от 0.2 до 0.5 фазовые переходы для обоих параметров порядка происходят в практически в одном и том же температурном диапазоне.

Список публикаций:

- [1] Binder K., Luijten E. // *Physics reports* 344. 2001. p. 361-364
- [2] Diep H. T., Bocchetti V., Hoang D. T., Ngo V. T. // *Phys.:Conf. Series* 537. 2014. 012001
- [3] Шарафуллин И. Ф., Кызыргулов И. Р., Тавлыкаев Р. Ф. // *Вестник БашГУ*. 2014. Т. 19, № 2, С. 390-394
- [4] Kharrasov M. K., Kyzylgulov I. R., Sharafullin I. F. et. al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 80. 2016. p. 695

## Синтез и магнитные свойства трехслойных пленок CoNi/Si/FeNi

**Живая Яна Александровна**

Сибирский федеральный университет

Патрин Геннадий Семенович, д.ф.-м.н.

[zhivaya.yana@mail.ru](mailto:zhivaya.yana@mail.ru)

Пленочные системы, состоящие из чередующихся слоев магнитомягкого и магнито жесткого материалов, являются подходящими объектами для использования в устройствах спиновой электроники. Межслоевое взаимодействие в таких системах является ответственным за формирование магнитного состояния. В случае, когда имеет место сопряжение ферромагнитного и антиферромагнитного слоев, как правило реализуется эффект обменного смещения и весь наблюдаемый процесс намагничивания связан с поведением ферромагнитного слоя [1]. Когда сопрягаются ферромагнитные магнитомягкий и магнито жесткий слои может возникать новое состояние, типа «магнитной пружины». В этом случае процесс намагничивания проходит через определенные стадии, и петля гистерезиса имеет характерную форму [2]. Изначально такие системы изучались в связи с исследованием многокомпонентных постоянных магнитов [3]. Затем были изучены особенности намагничивания слоисто-неоднородных структур в зависимости от толщины магнитомягкого и магнито жесткого слоев, межслоевого взаимодействия и анизотропии слоев [4]. Однако в случае, когда межслоевое взаимодействие является регулируемым, есть основание ожидать новых проявлений, что может иметь практическое значение. В работе [5] приведены результаты исследований многослойных структур (системы Co-P) магнито жесткий/магнитомягкий материалы (с количеством блоков до 40) с эффектом магнитной пружины, где в качестве промежуточного слоя использовался немагнитный слой аморфного NiP.

Методом ионно-плазменного распыления впервые синтезированы пленки композиции CoNi/Si/FeNi (базовый вакуум составлял  $10^{-6} - 10^{-7}$  Тор.). Содержания никеля в слое CoNi составляло 19.5 ат. %, а в слое FeNi